

динамической системой $f(p, t)$, является локально «сжимающимся», так как переводит за конечное время множество $S(M, \delta)$ в множество $S(M, \delta')$, где $\delta' < \delta$.

Литература

1. Зубов В.И. К управлению движением заряженных частиц в магнитном поле // Докл. АН СССР. 1977. Т.232, № 4. С. 798-799.
2. Зубов И.В. Устойчивость стационарных режимов нелинейных управляемых систем // Математические методы оптимизации и

управления в сложных системах: межвуз. темат. сб. Калинин, 1981. С. 13-20.

3. Зубова А.Ф., Зубов И.В. Методы приближенных вычислений объектов ЦБП. Л., 1981. С. 16-79.

4. Проблемы устойчивости матриц и вычислительных алгоритмов / Л.Д. Блистанова, Г.А. Зеленков, И.В. Зубов, Н.В. Зубов. СПб.: Изд-во НИИ Химии СПбГУ, 2007. 150 с.

5. Зубов Н.В., Зубова А.Ф. Безопасность функционирования технических систем. СПб.: Изд-во НИИ Химии СПбГУ, 2010. 342 с.

УДК 621.311.004.12

*В.А. Козлов, Г.А. Большанин**

СОГЛАСОВАННЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ОДНОРОДНОЙ ТРЕХПРОВОДНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Определены условия согласования однородной трехпроводной линии электропередачи (ЛЭП) напряжением 110кВ и выше с электрической нагрузкой, оценена ее пропускная способность. Рассмотрены различные варианты исполнения линий. Определены законы распространения напряжений и токов при согласовании линии электропередачи с электрической нагрузкой.

Ключевые слова: согласованный режим, трехпроводная линия электропередачи, электрическая нагрузка, падающая волна, отраженная волна, постоянная распространения, волновое сопротивление.

На современных промышленных предприятиях существенное распространение получили нагрузки с нелинейными вольтамперными характеристиками. К их числу относятся различного рода вентильные преобразователи, установки дуговой и контактной электросварки и т. д. Данные потребители являются источниками высших гармоник токов и напряжений, которые отрицательно сказываются на работе электрооборудования, систем релейной защиты, автоматики, телемеханики и связи. Низкое качество электрической энергии приводит к снижению надежности электроэнергетических объектов, к сокращению срока службы оборудования, негативно отражается на технологии производства.

Одним из методов улучшения качества электрической энергии в высоковольтных линиях электропередачи большой протяженности трехпроводного исполнения напряжением 110кВ и выше может быть ее согласование с электрической нагрузкой. В этом случае

вследствие исключения отраженной волны электромагнитного поля заметно уменьшаются потери электрической энергии.

Известно условие согласования нагрузки с однопроводной линией электропередачи, которое отражено равенством [1]

$$\underline{Z}_{2n} = \underline{Z}_{cn}, \quad (1)$$

где \underline{Z}_{2n} – изображение полного сопротивления электрической нагрузки на комплексной плоскости для n -ой гармонической составляющей напряжения и тока, Ом; \underline{Z}_{cn} – полное волновое сопротивление линии, Ом.

Условие согласования трехпроводной ЛЭП с электрической нагрузкой имеет другой вид. Своеобразие этого условия обусловлено тем, что передача электрической энергии по трехпроводным ЛЭП большой протяженности обеспечивается тремя парами волн электро-

* - автор, с которым следует вести переписку.

магнитного поля, а не одной, как в однопроводной ЛЭП [2, 3].

При формировании условий согласования трехпроводной ЛЭП с электрической нагрузкой необходимо учитывать особенности исполнения этой линии. В данном случае следует рассмотреть: а) несимметричную трехпроводную ЛЭП; б) симметричную трехпроводную ЛЭП, входящую в состав несимметричной электроэнергетической системы; в) симметричную трехпроводную ЛЭП, входящую в состав симметричной электроэнергетической системы.

а) Пусть длинная несимметричная однородная трехпроводная ЛЭП 220кВ обладает относительной однородностью. Из-за несимметричного исполнения ЛЭП 220кВ распределенные продольные и поперечные параметры линии вдоль всей ее протяженности оказываются неравны между собой, что, в конечном счете, является причиной обеспечения передачи электрической энергии по проводам ЛЭП 220кВ тремя парами волн электромагнитного поля, каждая из которых характеризуется своей постоянной распространения [2]:

$$\gamma_{1n} \neq \gamma_{2n} \neq \gamma_{3n}. \quad (2)$$

Каждая пара волн электромагнитного поля характеризуется одним собственным и двумя взаимными волновыми сопротивлениями, также неравными по величине [2]. В распределении электрической энергии участвуют три падающие и три отраженные волны электромагнитного поля. В результате согласования такой ЛЭП с электрической нагрузкой возможно исключение лишь одной отраженной волны электромагнитного поля какой-либо одной частоты [1] каждой фазы. При этом законы распределения напряжения и тока, например, в фазе А, при исключении первой (условно) отраженной волны электромагнитного поля запишутся так:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{An} &= \dot{U}_{1An} \cdot e^{-\gamma_{1n}l} + \dot{U}_{1An} \operatorname{ch} \gamma_{2n}l - \\ &- \dot{I}_{1An} \underline{Z}_{cA2n} \operatorname{sh} \gamma_{2n}l + \dot{U}_{1An} \operatorname{ch} \gamma_{3n}l - \\ &- \dot{I}_{1An} \underline{Z}_{cA3n} \operatorname{sh} \gamma_{3n}l; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{An} &= \dot{I}_{1An} \cdot e^{-\gamma_{1n}l} - \frac{\dot{U}_{1An}}{\underline{Z}_{cA2n}} \operatorname{sh} \gamma_{2n}l + \\ &+ \dot{I}_{1An} \operatorname{ch} \gamma_{2n}l - \frac{\dot{U}_{1An}}{\underline{Z}_{cA3n}} \operatorname{sh} \gamma_{3n}l + \\ &+ \dot{I}_{1An} \operatorname{ch} \gamma_{3n}l + \frac{\dot{I}_{1Bn} \underline{Z}_{cB1n}}{\underline{Z}_{cAB1n}} \cdot e^{-\gamma_{1n}l} - \\ &- \frac{\dot{U}_{1Bn}}{\underline{Z}_{cAB2n}} \operatorname{sh} \gamma_{2n}l + \frac{\dot{I}_{1Bn} \underline{Z}_{cB2n}}{\underline{Z}_{cAB2n}} \operatorname{ch} \gamma_{2n}l - \\ &- \frac{\dot{U}_{1Bn}}{\underline{Z}_{cAB3n}} \operatorname{sh} \gamma_{3n}l + \frac{\dot{I}_{1Bn} \underline{Z}_{cB3n}}{\underline{Z}_{cAB3n}} \operatorname{ch} \gamma_{3n}l + \\ &+ \frac{\dot{I}_{1Cn} \underline{Z}_{cC1n}}{\underline{Z}_{cCA1n}} \cdot e^{-\gamma_{1n}l} - \frac{\dot{U}_{1Cn}}{\underline{Z}_{cCA2n}} \operatorname{sh} \gamma_{2n}l + \\ &+ \frac{\dot{I}_{1Cn} \underline{Z}_{cC2n}}{\underline{Z}_{cCA2n}} \operatorname{ch} \gamma_{2n}l - \frac{\dot{U}_{1Cn}}{\underline{Z}_{cCA3n}} \operatorname{sh} \gamma_{3n}l + \\ &+ \frac{\dot{I}_{1Cn} \underline{Z}_{cC3n}}{\underline{Z}_{cCA3n}} \operatorname{ch} \gamma_{3n}l, \end{aligned} \quad (4)$$

где \dot{U}_{1An} – фазное напряжение в начале рассматриваемого участка, В; \dot{I}_{1An} – фазный ток в начале рассматриваемого участка ВЛЭП 220кВ, А; \underline{Z}_{cA1n} , \underline{Z}_{cA2n} , \underline{Z}_{cA3n} – собственные волновые сопротивления фазы А, Ом; \underline{Z}_{cAB1n} , \underline{Z}_{cAB2n} , \underline{Z}_{cAB3n} , \underline{Z}_{cCA1n} , \underline{Z}_{cCA2n} , \underline{Z}_{cCA3n} – взаимные волновые сопротивления фазы А, Ом; γ_{1n} , γ_{2n} , γ_{3n} – коэффициенты распространения волн электромагнитного поля; l – длина рассматриваемого участка ВЛЭП 220кВ, км.

На основании анализа формул (3, 4) с учетом отличных друг от друга коэффициентов распространения (2) условия согласования для несимметричной однородной трехпроводной ЛЭП 220кВ определяются следующим образом:

$$\frac{\dot{U}_{Ar\gamma_1}}{\dot{I}_{Ar\gamma_1}} = \frac{\dot{U}_{A.2}}{\dot{I}_{A.2}}; \quad \frac{\dot{U}_{Br\gamma_1}}{\dot{I}_{Br\gamma_1}} = \frac{\dot{U}_{B.2}}{\dot{I}_{B.2}}; \quad \frac{\dot{U}_{Cr\gamma_1}}{\dot{I}_{Cr\gamma_1}} = \frac{\dot{U}_{C.2}}{\dot{I}_{C.2}}, \quad (5)$$

где $\dot{U}_{Ar\gamma_1}$, $\dot{U}_{Br\gamma_1}$, $\dot{U}_{Cr\gamma_1}$ – фазные напряжения на клеммах источника питания (начало линии) от первой пары (условно) волны электромагнитного поля, определяемые по формулам:

$\dot{U}_{An\gamma_1} = \dot{U}_{1An} e^{-\gamma_{1n} l} = \dot{U}_{A.2}$;
 $\dot{U}_{Bn\gamma_1} = \dot{U}_{1Bn} e^{-\gamma_{1n} l} = \dot{U}_{B.2}$; $\dot{U}_{Cn\gamma_1} = \dot{U}_{1Cn} e^{-\gamma_{1n} l} = \dot{U}_{C.2}$;
 $\dot{U}_{A.2}$, $\dot{U}_{B.2}$, $\dot{U}_{C.2}$ – фазные напряжения на клеммах электрической нагрузки (коней линии); $\dot{I}_{An\gamma_1}$, $\dot{I}_{Bn\gamma_1}$, $\dot{I}_{Cn\gamma_1}$ – линейные токи от источника питания (начало линии) от первой пары (условно) волны электромагнитного поля, определяемые по формулам:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{An\gamma_1} &= \dot{I}_{1An} e^{-\gamma_{1n} l} + \frac{\dot{I}_{1Bn} \cdot \underline{Z}_{cB1n}}{\underline{Z}_{cAB1n}} e^{-\gamma_{1n} l} + \\ &+ \frac{\dot{I}_{1Cn} \cdot \underline{Z}_{cC1n}}{\underline{Z}_{cCA1n}} e^{-\gamma_{1n} l} = \dot{I}_{A.2}; \\ \dot{I}_{Bn\gamma_1} &= \dot{I}_{1Bn} e^{-\gamma_{1n} l} + \frac{\dot{I}_{1An} \cdot \underline{Z}_{cA1n}}{\underline{Z}_{cAB1n}} e^{-\gamma_{1n} l} + \\ &+ \frac{\dot{I}_{1Cn} \cdot \underline{Z}_{cC1n}}{\underline{Z}_{cBC1n}} e^{-\gamma_{1n} l} = \dot{I}_{B.2}; \\ \dot{I}_{Cn\gamma_1} &= \dot{I}_{1Cn} e^{-\gamma_{1n} l} + \frac{\dot{I}_{1An} \cdot \underline{Z}_{cA1n}}{\underline{Z}_{cCA1n}} e^{-\gamma_{1n} l} + \\ &+ \frac{\dot{I}_{1Bn} \cdot \underline{Z}_{cB1n}}{\underline{Z}_{cBC1n}} e^{-\gamma_{1n} l} = \dot{I}_{C.2}; \end{aligned}$$

$\dot{I}_{A.2}$, $\dot{I}_{B.2}$, $\dot{I}_{C.2}$ – линейные токи электрической нагрузки (конец линии).

Формулы (5) могут принять вид:

$$\left. \begin{aligned} \underline{Z}_{cA1n} + \underline{Z}_{cAB1n} \cdot \frac{\dot{U}_{1An}}{\dot{U}_{1Bn}} + \underline{Z}_{cCA1n} \cdot \frac{\dot{U}_{1An}}{\dot{U}_{1Cn}} &= \underline{Z}_{A.2}; \\ \underline{Z}_{cB1n} + \underline{Z}_{cAB1n} \cdot \frac{\dot{U}_{1Bn}}{\dot{U}_{1An}} + \underline{Z}_{cBC1n} \cdot \frac{\dot{U}_{1Bn}}{\dot{U}_{1Cn}} &= \underline{Z}_{B.2}; \\ \underline{Z}_{cC1n} + \underline{Z}_{cCA1n} \cdot \frac{\dot{U}_{1Cn}}{\dot{U}_{1An}} + \underline{Z}_{cBC1n} \cdot \frac{\dot{U}_{1Cn}}{\dot{U}_{1Bn}} &= \underline{Z}_{C.2}. \end{aligned} \right\} (6)$$

Напряжение и ток в линии А от первой пары волн электромагнитного поля можно представить и так [2]:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{An\gamma_1} &= \\ &= \left(\frac{\dot{I}_{A.2} \cdot \underline{Z}_{A.2} + \dot{I}_{A.2} \cdot \underline{Z}_{cA1n}}{2} \cdot e^{\gamma_{1n} y} - \frac{\dot{I}_{A.2} \cdot \underline{Z}_{A.2} - \dot{I}_{A.2} \cdot \underline{Z}_{cA1n}}{2} \cdot e^{-\gamma_{1n} y} \right); \\ \dot{I}_{An\gamma_1} &= \\ &= \left(\frac{\dot{I}_{A.2} \cdot \underline{Z}_{A.2} + \dot{I}_{A.2} \cdot \underline{Z}_{cA1n}}{2 \cdot \underline{Z}_{cA1n}} \cdot e^{\gamma_{1n} y} - \frac{\dot{I}_{A.2} \cdot \underline{Z}_{A.2} - \dot{I}_{A.2} \cdot \underline{Z}_{cA1n}}{2 \cdot \underline{Z}_{cA1n}} \cdot e^{-\gamma_{1n} y} \right) + \\ &+ \frac{\dot{I}_{B.2} \cdot \underline{Z}_{B.2} + \dot{I}_{B.2} \cdot \underline{Z}_{cB1n}}{2 \cdot \underline{Z}_{cAB1n}} \cdot e^{\gamma_{1n} y} - \frac{\dot{I}_{B.2} \cdot \underline{Z}_{B.2} - \dot{I}_{B.2} \cdot \underline{Z}_{cB1n}}{2 \cdot \underline{Z}_{cAB1n}} \cdot e^{-\gamma_{1n} y} + \\ &+ \frac{\dot{I}_{C.2} \cdot \underline{Z}_{C.2} + \dot{I}_{C.2} \cdot \underline{Z}_{cC1n}}{2 \cdot \underline{Z}_{cCA1n}} \cdot e^{\gamma_{1n} y} - \frac{\dot{I}_{C.2} \cdot \underline{Z}_{C.2} - \dot{I}_{C.2} \cdot \underline{Z}_{cC1n}}{2 \cdot \underline{Z}_{cCA1n}} \cdot e^{-\gamma_{1n} y} \end{aligned} \right\} (7)$$

где y – протяженность рассматриваемого участка ЛЭП 220кВ от места соединения с нагрузкой, км.

Первое слагаемое в первом равенстве (7), а также первое, третье и пятое слагаемые во втором равенстве (7), иллюстрируют действие первой падающей волны электромагнитного поля, а второе слагаемое в первом равенстве и второе, четвертое и шестое слагаемые во втором равенстве – действие первой отраженной волны электромагнитного поля. Из этих формул очевидно, что действие первой отраженной волны электромагнитного поля исключается при соблюдении равенств:

$$\underline{Z}_{A.2} = \underline{Z}_{cA1n}; \quad \underline{Z}_{B.2} = \underline{Z}_{cB1n}; \quad \underline{Z}_{C.2} = \underline{Z}_{cC1n}. \quad (8)$$

б) Симметричное исполнение однородной трехпроводной ЛЭП 220кВ, входящей в состав несимметричной электроэнергетической системы, предполагает равенство продольных и поперечных параметров между собой по всей ее длине [2]. Однако напряжения и токи в такой ЛЭП по линейным проводам распределены неравномерно, что является причиной участия в обеспечении передачи электрической энергии по проводам ЛЭП 220кВ тремя парами волн электромагнитного поля. Каждая пара волн электромагнитного поля характеризуется своей постоянной распространения и собственными волновыми сопротивлениями. Причем, эти сопротивления вследствие симметрии рассматриваемого участка ЛЭП для каждого линейного провода равновелики, но из-за неравенства постоянных распространения (2) различны для каждой пары волн электромагнитного поля [2]:

$$\left. \begin{aligned} \underline{Z}_{cA1.n} = \underline{Z}_{cB1.n} = \underline{Z}_{cC1.n}; \\ \underline{Z}_{cA2.n} = \underline{Z}_{cB2.n} = \underline{Z}_{cC2.n}; \\ \underline{Z}_{cA3.n} = \underline{Z}_{cB3.n} = \underline{Z}_{cC3.n}. \end{aligned} \right\} (11)$$

Законы распределения напряжения и тока, например, для фазы А, в этом случае можно представить так [2]:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{An} &= \dot{U}_{1An} \cdot e^{-\gamma_{1n} l} + \dot{U}_{1An} ch\gamma_{2n} l - \\ &- \dot{I}_{1An} \underline{Z}_{cA2n} sh\gamma_{2n} l + \\ &+ \dot{U}_{1An} ch\gamma_{3n} l - \dot{I}_{1An} \underline{Z}_{cA3n} sh\gamma_{3n} l; \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{An} &= \dot{I}_{1An} \cdot e^{-\gamma_{1n}l} - \frac{\dot{U}_{1An}}{\underline{Z}_{cA2n}} sh\gamma_{2n}l + \\ &+ \dot{I}_{1An} ch\gamma_{2n}l - \\ &- \frac{\dot{U}_{1An}}{\underline{Z}_{cA3n}} sh\gamma_{3n}l + \dot{I}_{1An} ch\gamma_{3n}l. \end{aligned} \quad (13)$$

Законы распределения напряжения и тока вдоль рассматриваемой ЛЭП от первой (условно) пары волн электромагнитного поля запишутся так [2]:

$$\dot{U}_{A\gamma_{1l}} = \left(\frac{\dot{I}_{A.2} \cdot \underline{Z}_{A.2} + \dot{I}_{A.2} \cdot \underline{Z}_{cA1n}}{2} \cdot e^{\gamma_{1n}y} - \frac{\dot{I}_{A.2} \cdot \underline{Z}_{A.2} - \dot{I}_{A.2} \cdot \underline{Z}_{cA1n}}{2} \cdot e^{-\gamma_{1n}y} \right); \quad (14)$$

$$\dot{I}_{A\gamma_{1l}} = \left(\frac{\dot{I}_{A.2} \cdot \underline{Z}_{A.2} + \dot{I}_{A.2} \cdot \underline{Z}_{cA1n}}{2 \cdot \underline{Z}_{cA1n}} \cdot e^{\gamma_{1n}y} - \frac{\dot{I}_{A.2} \cdot \underline{Z}_{A.2} - \dot{I}_{A.2} \cdot \underline{Z}_{cA1n}}{2 \cdot \underline{Z}_{cA1n}} \cdot e^{-\gamma_{1n}y} \right); \quad (15)$$

$$\dot{U}_{B\gamma_{1l}} = \left(\frac{\dot{I}_{B.2} \cdot \underline{Z}_{B.2} + \dot{I}_{B.2} \cdot \underline{Z}_{cB1n}}{2} \cdot e^{\gamma_{1n}y} - \frac{\dot{I}_{B.2} \cdot \underline{Z}_{B.2} - \dot{I}_{B.2} \cdot \underline{Z}_{cB1n}}{2} \cdot e^{-\gamma_{1n}y} \right); \quad (16)$$

$$\dot{I}_{B\gamma_{1l}} = \left(\frac{\dot{I}_{B.2} \cdot \underline{Z}_{B.2} + \dot{I}_{B.2} \cdot \underline{Z}_{cB1n}}{2 \cdot \underline{Z}_{cB1n}} \cdot e^{\gamma_{1n}y} - \frac{\dot{I}_{B.2} \cdot \underline{Z}_{B.2} - \dot{I}_{B.2} \cdot \underline{Z}_{cB1n}}{2 \cdot \underline{Z}_{cB1n}} \cdot e^{-\gamma_{1n}y} \right); \quad (17)$$

$$\dot{U}_{C\gamma_{1l}} = \left(\frac{\dot{I}_{C.2} \cdot \underline{Z}_{C.2} + \dot{I}_{C.2} \cdot \underline{Z}_{cC1n}}{2} \cdot e^{\gamma_{1n}y} - \frac{\dot{I}_{C.2} \cdot \underline{Z}_{C.2} - \dot{I}_{C.2} \cdot \underline{Z}_{cC1n}}{2} \cdot e^{-\gamma_{1n}y} \right); \quad (18)$$

$$\dot{I}_{C\gamma_{1l}} = \left(\frac{\dot{I}_{C.2} \cdot \underline{Z}_{C.2} + \dot{I}_{C.2} \cdot \underline{Z}_{cC1n}}{2 \cdot \underline{Z}_{cC1n}} \cdot e^{\gamma_{1n}y} - \frac{\dot{I}_{C.2} \cdot \underline{Z}_{C.2} - \dot{I}_{C.2} \cdot \underline{Z}_{cC1n}}{2 \cdot \underline{Z}_{cC1n}} \cdot e^{-\gamma_{1n}y} \right). \quad (19)$$

В формулах (14) – (19), как и в равенствах (7), первые слагаемые иллюстрируют действие падающей волны электромагнитного поля, а вторые – действие отраженной волны. Очевидно, что и в этом случае действие отраженной волны будет отсутствовать при соблюдении равенств

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{A.2} &= \underline{Z}_{cA1n}; & \underline{Z}_{B.2} &= \underline{Z}_{cB1n}; \\ \underline{Z}_{C.2} &= \underline{Z}_{cC1n}. \end{aligned}$$

В таком случае условие согласованного режима работы симметричной однородной трехпроводной ЛЭП 220кВ, входящей в состав несимметричной электроэнергетической системы, можно представить следующим образом:

$$\frac{\dot{U}_{A\gamma_{1l}}}{\dot{I}_{A\gamma_{1l}}} = \frac{\dot{U}_{A.2}}{\dot{I}_{A.2}}; \quad \frac{\dot{U}_{B\gamma_{1l}}}{\dot{I}_{B\gamma_{1l}}} = \frac{\dot{U}_{B.2}}{\dot{I}_{B.2}}; \quad \frac{\dot{U}_{C\gamma_{1l}}}{\dot{I}_{C\gamma_{1l}}} = \frac{\dot{U}_{C.2}}{\dot{I}_{C.2}}, \quad (20)$$

где $\dot{U}_{A\gamma_{1l}} = \dot{U}_{1An} \cdot e^{-\gamma_{1n}l} = \dot{U}_{A.2}$;

$\dot{U}_{B\gamma_{1l}} = \dot{U}_{1Bn} \cdot e^{-\gamma_{1n}l} = \dot{U}_{B.2}$;

$\dot{U}_{C\gamma_{1l}} = \dot{U}_{1Cn} \cdot e^{-\gamma_{1n}l} = \dot{U}_{C.2}$;

$\dot{I}_{A\gamma_{1l}} = \dot{I}_{1An} \cdot e^{-\gamma_{1n}l} = \dot{I}_{A.2}$; $\dot{I}_{B\gamma_{1l}} = \dot{I}_{1Bn} \cdot e^{-\gamma_{1n}l} = \dot{I}_{B.2}$;

$\dot{I}_{C\gamma_{1l}} = \dot{I}_{1Cn} \cdot e^{-\gamma_{1n}l} = \dot{I}_{C.2}$.

Как и для несимметричной однородной трехпроводной ВЛЭП 220кВ, в рассматриваемом случае возможно исключение лишь одной отраженной волны электромагнитного поля. Однако следует отметить, что симметрия рассматриваемой ЛЭП способствует существенному уменьшению громоздкости законов распределения напряжений и токов вдоль линии электропередачи (12) – (13).

в) В симметричном однородном трехпроводном участке высоковольтной линии электропередачи, входящий в состав симметричной электроэнергетической системы, первичные параметры линии оказываются равны между собой:

$$\left. \begin{aligned} M_{0ABn} &= M_{0BCn} = M_{0CAn} \\ \underline{Z}_{0ABn} &= \underline{Z}_{0BCn} = \underline{Z}_{0CAn}; \\ \underline{Z}_{An} &= \underline{Z}_{Bn} = \underline{Z}_{Cn}, \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

где M_{0ABn} , M_{0BCn} , M_{0CAn} – взаимные индуктивности линейных проводов, Гн; \underline{Z}_{0ABn} , \underline{Z}_{0BCn} , \underline{Z}_{0CAn} – взаимные сопротивления ли-

нейных проводов, Ом; \underline{Z}_{An} , \underline{Z}_{Bn} , \underline{Z}_{Cn} – продольные сопротивления линейных проводов, Ом.

В этом случае передача электрической энергии обеспечивается одной парой волн электромагнитного поля [2]. Собственные волновые сопротивления в каждом линейном проводе оказываются одинаковыми:

$$\underline{Z}_{cA.n} = \underline{Z}_{cB.n} = \underline{Z}_{cC.n}. \quad (22)$$

Из-за симметрии первичных параметров линии взаимные волновые сопротивления здесь становятся беспрельдно малыми и учету не подлежат.

Симметричная электроэнергетическая система представляет собой совокупность симметричных участков, то есть устройств, предназначенных для генерации, передачи, преобразования и потребления электрической энергии. Получается, что генераторы электрических станций, линии электропередачи, трансформаторные подстанции, приемники электрической энергии и сопутствующее им электротехническое оборудование в этом случае представляют собой симметричные системы. В данной ситуации можно констатировать факт равенства величин фазных и линейных напряжений и токов между собой, но различающихся друг от друга на треть периода, то есть на угол 120° . При таких условиях справедливы равенства:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{An} + \dot{I}_{Bn} + \dot{I}_{Cn} &= 0 \\ \dot{U}_{An} + \dot{U}_{Bn} + \dot{U}_{Cn} &= 0 \\ \dot{U}_{ABn} + \dot{U}_{BCn} + \dot{U}_{CAn} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

Справедливость формул (23) обеспечивает равенство между собой коэффициентов распространения [2]:

$$\gamma_{1n} = \gamma_{2n} = \gamma_{3n} = \gamma_n, \quad (24)$$

что подтверждает факт обеспечения передачи электрической энергии по линии электропередачи, входящей в состав симметричной электроэнергетической системы, одной парой волн электромагнитного поля.

С учетом равенства (24) оказывается возможным такое согласование линии электропередачи с электрической нагрузкой, при котором исключаются все три отраженные волны электромагнитного поля. В таком случае

условие согласования симметричной однофазной трехпроводной ЛЭП 220кВ, входящей в состав симметричной электроэнергетической системы, следует представить так:

$$\frac{\dot{U}_{An}}{\dot{I}_{An}} = \frac{\dot{U}_{A.2}}{\dot{I}_{A.2}}, \quad (25)$$

где $\dot{U}_{An} = \dot{U}_{Bn} = \dot{U}_{Cn}$ – фазные напряжения на клеммах источника питания (начало линии), В; $\dot{U}_{A.2} = \dot{U}_{B.2} = \dot{U}_{C.2}$ – фазные напряжения на клеммах симметричной электрической нагрузки (конец линии), В; $\dot{I}_{An} = \dot{I}_{Bn} = \dot{I}_{Cn}$ – линейные токи в начале линии, А; $\dot{I}_{A.2} = \dot{I}_{B.2} = \dot{I}_{C.2}$ – линейные токи в конце линии, А.

Пусть симметричная ЛЭП 220кВ обеспечивает электрической энергией симметричную нагрузку, в состав которой входят преобразователи с двенадцатипульсной схемой выпрямления [4, 5], являющейся источником преимущественно одиннадцатой и тринадцатой гармонических составляющих тока и напряжения [6]. То есть, пусть для рассмотрения в качестве примера будет избрана симметричная ЛЭП, входящая в состав симметричной электроэнергетической системы. Протяженность рассматриваемого участка ЛЭП пусть будет 100 км.

На рис. 1 показано распределение фазного напряжения вдоль этой линии электропередачи на частотах для тринадцатой (1) и одиннадцатой (2) гармоник. Здесь черные линии иллюстрируют распределение фазных напряжений при согласовании исследуемой ЛЭП с электрической нагрузкой (25). В этом случае передача электрической энергии обеспечивается лишь тремя падающими волнами электромагнитного поля. Серыми линиями здесь показано распределение фазного напряжения при несогласованности линии с электрической нагрузкой. Из графических интерпретаций законов распределения фазного напряжения вдоль ЛЭП видно, что для обеспечения электрической нагрузки нужным количеством электрической энергии источник питания при согласованной ЛЭП может иметь меньшую величину напряжения.

На рис. 2 представлены графические интерпретации законов распределения линейного тока по проводам исследуемой ЛЭП на частотах тринадцатой (1), одиннадцатой (2) гармоник. Здесь черными линиями иллюстри-

руются законы распределения линейного тока вдоль линии, согласованной с электрической нагрузкой. В распределении этого тока участвуют лишь три падающие волны электромагнитного поля. Серыми линиями показаны графические интерпретации законов распределения линейного тока при нарушении такого согласования. Из этих иллюстраций оче-

видно, что для обеспечения нужного тока нагрузки ток от источника электрической энергии при согласовании линии с электрической нагрузкой может иметь меньшее значение.

Отмеченные факты свидетельствуют о существенном повышении пропускной способности ЛЭП при ее согласовании с электрической нагрузкой.

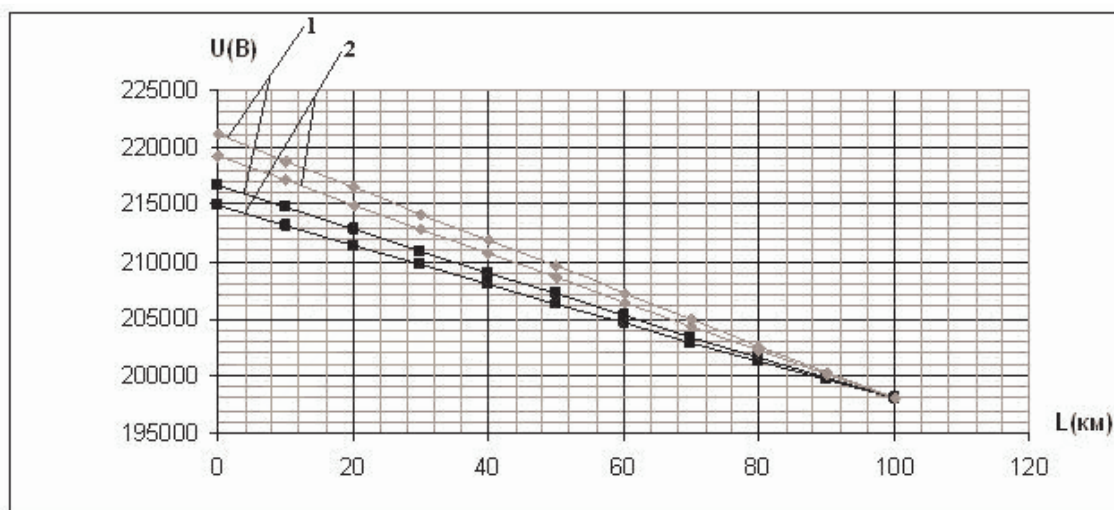


Рис. 1. Распределение фазного напряжения вдоль ВЛЭП 220кВ для тринадцатой (1) и одиннадцатой (2) гармоник.

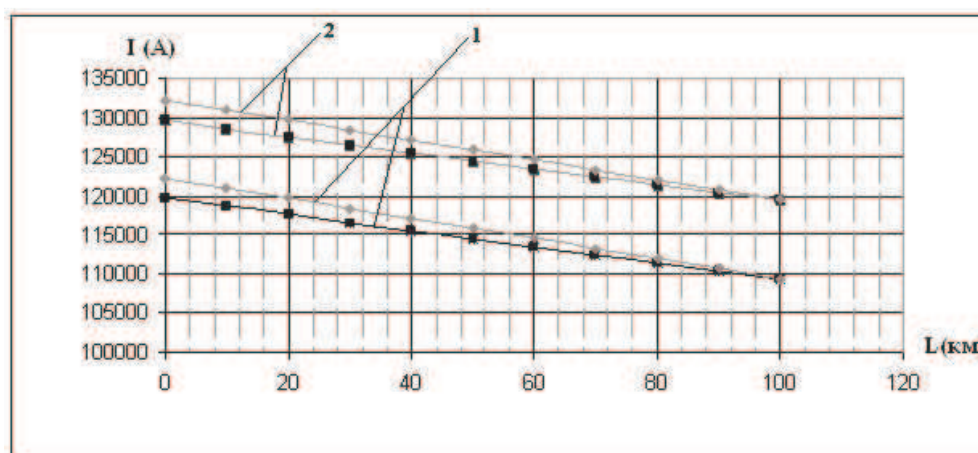


Рис. 2. Распределение токов фаз А, В, С по рассматриваемому участку ВЛЭП 220кВ для тринадцатой (1) и одиннадцатой (2) гармоник.

Выводы

1. При согласовании несимметричной ЛЭП с электрической нагрузкой достигается исключение лишь одной отраженной волны электромагнитного поля.

2. При согласовании симметричной ЛЭП, входящей в состав несимметричной электроэнергетической системы, также достигается

исключение лишь одной отраженной волны электромагнитного поля.

3. При согласовании симметричной ЛЭП, входящей в состав симметричной электроэнергетической системы, достигается исключение трех отраженных волн электромагнитного поля.

4. Пропускная способность ЛЭП при ее согласовании с электрической нагрузкой увеличивается.

Литература

1. Большанин Г.А. Коррекция качества электрической энергии. Братск: БрГУ, 2007. 120 с.

2. Большанин Г.А. Распределение электрической энергии пониженного качества по участкам электроэнергетических систем. В 2 кн. Братск: БрГУ, 2006. Кн. 1. 807с.

3. Большанин Г.А., Большанина, Л.Ю., Марьясова Е.Г. Особенности распространения электрической энергии по трехпроводной ли-

нии электропередачи // Системы. Методы. Технологии. 2011. № 3(11). С. 82-89

4. Справочник по проектированию электроснабжения, линий электропередачи и сетей / под ред. Я. М. Большама, В.И. Круповича, М. Л. Самовера. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1974. 695с.

5. Справочник по проектированию электроснабжения / под ред. Ю. Г. Барыбина, Л. Е. Федорова, М. Г. Зименкова. М.: Энергоатомиздат, 1990. 576 с.

6. Чепмен Д. Практическое руководство по качеству электроэнергии [Электронный ресурс].

URL // <http://www.decsy.com/Text/docharm/problem.pdf>. (дата обращения: 15.05.2011).

УДК 621.311.004.12

Г.А. Большанин, Л.Ю. Большанина, Е.Г. Марьясова*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕОРИИ МНОГОПОЛЮСНИКОВ И СИСТЕМЫ «МАТЛАВ» ПРИ РАСЧЕТЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ТРАНСПОРТИРОВКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Рассмотрены особенности распространения электрической энергии пониженного качества по неоднородным линиям электропередачи. Сформулированы законы распространения напряжений и тока по этим линиям. Представлены их графические интерпретации. Предложена методика анализа результатов транспортировки электрической энергии на основе теории многополюсников.

Ключевые слова: линия электропередачи, электрическая энергия пониженного качества, многополюсники, коэффициенты многополюсников, четырехполюсники, восьмиполусники, десятиполюсники, постоянная распространения электромагнитной волны.

Электрическая энергия, распространяемая по современным электроэнергетическим системам, часто отличается пониженным качеством, то есть заметными уровнями несинусоидальности, несимметрии, колебания и отклонения напряжений и токов. В данном случае интерес вызывает транспортировка такой электрической энергии от одного объекта системы электроснабжения к другому. Эта операция обычно реализуется при посредстве линий электропередачи (ЛЭП).

Анализ распределения электрической энергии пониженного качества по ЛЭП имеет свои особенности. В настоящее время определена методика анализа распределения по однородному участку ЛЭП электрической энергии на частоте какой-либо гармонической составляющей [1]. Результаты такого анализа

можно обобщить для всего спектра напряжений и токов. Но лишь для однородного участка ЛЭП.

Однородные ЛЭП – это идеализированный элемент электроэнергетической системы. Абсолютно однородных ЛЭП не существует. Но в каждой линии электропередачи можно выделить хотя бы относительно однородные участки. Границами этих однородных участков служат узлы или точки качественного раздела ЛЭП (изменение марки и взаимного расположения проводов, способа их прокладки, резкое изменение рельефа местности, состав грунта и т. п.). При анализе распределения электрической энергии предлагается представлять ЛЭП в виде цепной схемы, составленной из многополюсников, каждый из